

Marie STARÁ¹, Radim ČAJKA², Pavlína MATEČKOVÁ³, Vojtěch BUCHTA⁴

**LABORATORNÍ MĚŘENÍ DEFORMACÍ OBOUSMĚRNĚ
PŘEDPÍJATÉHO ZDIVA**

**LABORATORY MEASUREMENT OF DEFORMATIONS
OF BIDIRECTIONALLY PRESTRESSED MASONRY**

Abstrakt

Tento článek se věnuje laboratornímu měření deformací v místě lokálního namáhání zdiva od předpětí. Měření jsou prováděna na zděném rohu, který je vestavěn do laboratorního zařízení. Laboratorní zařízení bylo navrženo a vyrobeno na Stavební fakultě VŠB a je určené pro měření trojosé napjatosti zdiva. Ve zděném rohu jsou vloženy dvě předpínací tyče umístěné v různých výškách a upevněny do kotevních desek, které slouží pro přenos předpínacích sil do zdiva. Zdivo bylo předpínáno v obou směrech. Zděný roh je proveden v poměru ke skutečnosti 1:1.

Klíčová slova

Zdivo, předpětí, deformace, měření.

Abstract

This paper deals with laboratory measurements of deformations in the place exposed to local load caused by pre-stressing. The measurements are made at the masonry corner built in the laboratory equipment. The laboratory equipment was designed at Faculty of Civil Engineering VSB-TU Ostrava for measurement tri-axial stress-strain conditions in masonry. In this masonry corner two pre-stressing bars are placed. These bars are in different height and are anchored to the anchor plates, which transfer pre-stressing forces to the masonry. The masonry was pre-stressed in the both directions. The specimen for laboratory testing is performed in the proportion to the reality of 1:1.

Keywords

Masonry, pre-stressing, deformation, measurement.

1 ÚVOD

Sanace pomocí dodatečného předepnutí je podrobně prozkoumána u železobetonových konstrukcí, u zděných konstrukcí tomu tak není. Problematické je zejména stanovení pevnosti

¹ Ing. Marie Stará, Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 375, e-mail: marie.stara@vsb.cz.

² Prof. Ing. Radim Čajka, CSc., Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 344, e-mail: radim.cajka@vsb.cz.

³ Ing. Pavlína Matečková, Ph.D., Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 394, e-mail: pavlina.mateckova@vsb.cz.

⁴ Ing. Vojtěch Buchta, Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 925, e-mail: vojtech.buchta@vsb.cz.

s ohledem na aktuální stav zdiva, na charakter a míru poškození. Náročnější je pak stanovení hodnot předpínacích sil [1;2].

V dostupné literatuře můžeme nalézt doporučené hodnoty poměru předpínací síly a pevnosti zdiva v tlaku kolmo a rovnoběžně s ložnou spárou na základě provedených experimentů. Dle německých výzkumů [3] je možné hodnotu předpínací síly volit o velikosti 0,10 až 0,15 pevnosti zdiva kolmo na ložné spáry. Toto rozmezí se určí pomocí grafu, kde pevnost zdiva závisí na procentu vyplnění svislých spár maltou. Kvalita vyplnění svislých spár maltou ve zdivu rozhoduje o celkové pevnosti zdiva. Čím méně kvalitně jsou spáry vyplněny, tím je pevnost zdiva nižší. Podle [4;5] se předpínací síla volí o velikosti zhruba 1/10 pevnosti zdiva v tlaku kolmo k ložným spárám. Podle [6] může pevnost zdiva v tlaku rovnoběžně s ložnými spárami nabývat 0,1 až 0,85 násobku pevnosti kolmé k ložným spárám. Dle výsledků práce [7] se hodnoty pohybují v rozmezí 0,1 až 0,25 pevnosti zdiva kolmo na ložné spáry. Toto rozmezí je závislé na dostatečných informacích o zdivu a především jeho kvalitním vyplněním svislých spár maltou. U zdiva s dobře vyplněnými spárami se uvažuje o hodnotě 0,7 až 0,8 s tím, že by tato hodnota neměla být překročena.

Podrobnější informace pro výpočet předpínacích sil nebo analýzu napjatosti v oblasti kotevních desek nejsou v současných technických normách uvedeny.

Předpínací síly v experimentálním měření deformací, popsáném v tomto článku, jsou voleny bezpečně s ohledem na kvalitu vyplnění spár maltou jako 10, 20 a 30 % pevnosti zdiva v tlaku kolmo na ložné spáry. Záměrem tohoto zkoušení není pouze samotné měření deformací, ale také sledování chování zdiva v místě lokálního namáhání od postupně zvyšujícího se předpětí.

Prováděné zkoušky simulují chování zesilovaného zdiva předpínacími lany v okamžiku vnášení předpětí a jde tedy o zkoušky krátkodobé.

2 POSTUP MĚŘENÍ

2.1 Průběh zdění a stanovení materiálových charakteristik

Laboratorní zařízení pro zkoušení trojosé napjatosti je ocelová konstrukce o rozměrech 900 x 900 x 1550 [8]. V něm je vestavěn zděný roh o výšce 850 mm (11 řad cihel). Tloušťka zdi je 440 mm.



Obr. 1: Laboratorní zařízení a umístění předpínacích tyčí ve zdivu

Použitými zdícími prvky jsou cihly CP 290x140x65, P15 a jako spojovací materiál byla použita cementová malta M5 (snadno dostupná malta pro zdění), namíchaná s pískem v poměru 1:1. Záměrem smíchání malty a písku, bylo získat maltu o nižší pevnosti, která by lépe korespondovala s kvalitou vápenné malty u stávajících sanovaných objektů, která dosahovala pevnosti 0 - 0,4 MPa.

Pro zkoušky pevnosti zdících prvků bylo vybráno 10 vzorků (celé cihly), které byly odzkoušeny dle normy [9]. Průměrná pevnost cihel v tlaku byla stanovena na hodnotu 12,87 MPa. Z této hodnoty je pak odvozená normalizovaná průměrná pevnost v tlaku zdícího prvku $f_b = 9,9$ MPa. V průběhu zdění bylo postupně odebráno 6 vzorků malty a byly odzkoušeny dle normy [10]. Vzorky byly po celou dobu zrání ve stejných klimatických podmínkách jako zděný roh. Průměrná pevnost malty v tlaku $f_m = 0,653$ MPa.

Testovaný zděný roh je uvažován jako část stávající konstrukce a proto při výpočtu charakteristické pevnosti zdiva v tlaku je postupováno podle normy [11] – Hodnocení existujících konstrukcí, která se odkazuje při stanovení pevnostních charakteristik na dříve platné normy, pro zdivo např. na již neplatnou přednormu [12]. Pro výpočet charakteristické pevnosti zdiva v tlaku kolmo na ložné spáry potom tedy platí:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} \quad (1)$$

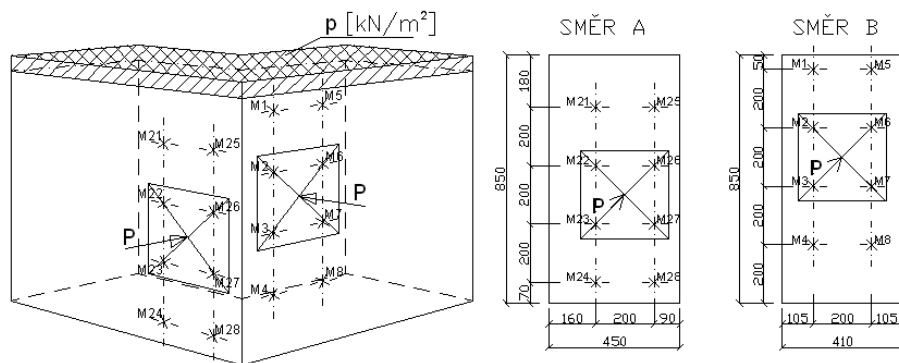
Konstanta K je závislá na druhu zdiva a skupině zdících prvků a dle [12] je rovna 0,4. Výsledná charakteristická pevnost zdiva v tlaku kolmo k ložným spárám je $f_k = 1,59$ MPa.

V průběhu zdění byly do zdiva vloženy dvě předpínací tyče v různých výškách viz obr.1. Každá předpínací tyč byla označena dle směru, ve kterém byla kladena (směr A a směr B). Ve směru A byla umístěna ve výšce 370 mm, ve směru B byla umístěna ve výšce 500 mm. Po konečném vyzdění celého zděného rohu byla horní část konstrukce vyrovnána vrstvou malty a na ni se osadila ocelová roznášecí deska o tloušťce 12 mm s navařenými ocelovými výztuhami pro zajištění rovnoměrného zatížení zdiva. Na předpínací tyče se osadily ocelové kotevní desky na vrstvu malty pro vyrovnání povrchu zdiva.

2.2 Zatížení testovaného vzorku

Po 28 dnech bylo zdivo připraveno na zatěžování a měření deformací. V první fázi se osadily příslušné zatěžovací zařízení. Svislé zatížení bylo vnášeno pomocí hydraulického válce, který se umístil mezi roznášecí deskou a I profilem přišroubovaným k laboratornímu zařízení. Vzorek byl zatížen svislým rovnoměrným zatížením 0,1 MPa.

Předpínací síla byla vnesena do předpínacích tyčí rovněž pomocí hydraulických válců přes kotevní desky o rozměrech 300 x 300 mm a tloušťce 10 mm. Hodnoty předpínacích sil jsou uvedeny v Tab.1. Měřené deformace byly zaznamenávány pomocí potenciometrických čidel upevněných k laboratornímu zařízení, označených dle připojení k měřicí stanici. V každém směru bylo upevněno celkem osm čidel, ve směru A čidla s označením M21 až M28 a ve směru B čidla s označením M1 až M8. Rozmístění jednotlivých čidel v obou směrech je patrné na obr.2.



Obr. 2: Schéma rozmístění měřicích čidel ve směru A a ve směru B

Předpínání probíhalo postupně. Vzorek se zatížil předpínací silou o velikosti 10 %, 20% a 30% z pevnosti zdiva v tlaku kolmo na ložné spáry, vždy nejprve ve směru A a poté ve směru B.

V Tab. 1 jsou uvedeny vstupní hodnoty zatížení zdiva. V prvním sloupci jsou uvedeny procentuální hodnoty, ve druhém jsou hodnoty napětí v kotevní oblasti, odvozené z charakteristické pevnosti zdiva v tlaku kolmém na ložné spáry, ve třetím sloupci jsou uvedeny velikosti předpínacích sil, vnášených do zdiva přes kotevní desku o velikosti 300 x 300 mm. Plocha kotevní desky a také plocha zdiva pod kotevní deskou, se uvažovala bez oslabení otvorem, který byl ponechán pro průchod předpínací tyče, jelikož rozměry otvoru jsou zanedbatelné.

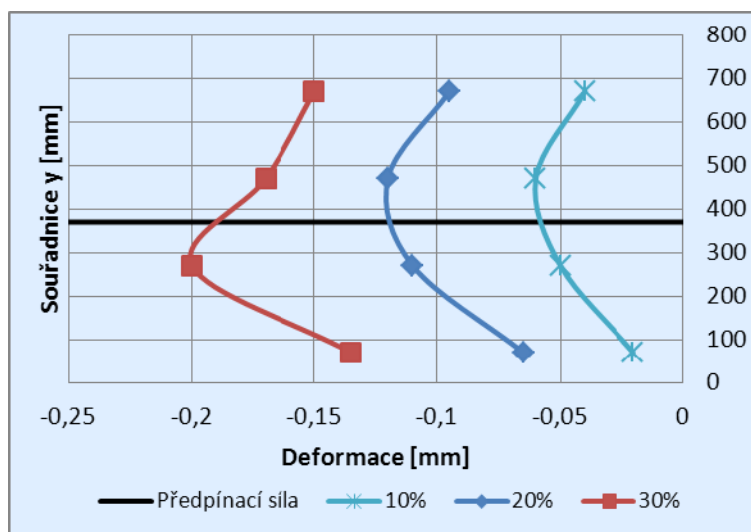
Tab. 1: Vstupní hodnoty pro kotevní desku o velikosti 300 x 300 mm, plocha desky $A = 0,09 \text{ m}^2$

	Napětí [kPa]	Předpínací síla [kN]
10 %	159	14,3
20 %	318	28,62
30 %	477	42,93

3 VÝSLEDNÉ DEFORMACE

Průběhy výsledných deformací lze vidět v grafech na obr.3 a obr.4. Na x-ové souřadnici jsou uvedeny hodnoty deformací se záporným znaménkem od tlaku kotevní desky na zdivo. Výsledné deformace jsou získané zprůměrováním měření ve svislých řezech M21 ~ M24 a M25 ~ M28 ve směru A (obr.3) a M1 ~ M4 a M5 ~ M8 ve směru B (obr.4). Na svislé ose jsou uvedeny výškové souřadnice umístění jednotlivých čidel dle obr.2. Všechna čidla byla umístěna na cihlách popř. kotevních deskách, nikoliv však v maltové spáře. Vodorovná přímka v grafu označuje umístění předpínací síly. Ve směru A je výška umístění předpínací síly 370 mm a ve směru B je výška předpínací síly 500 mm.

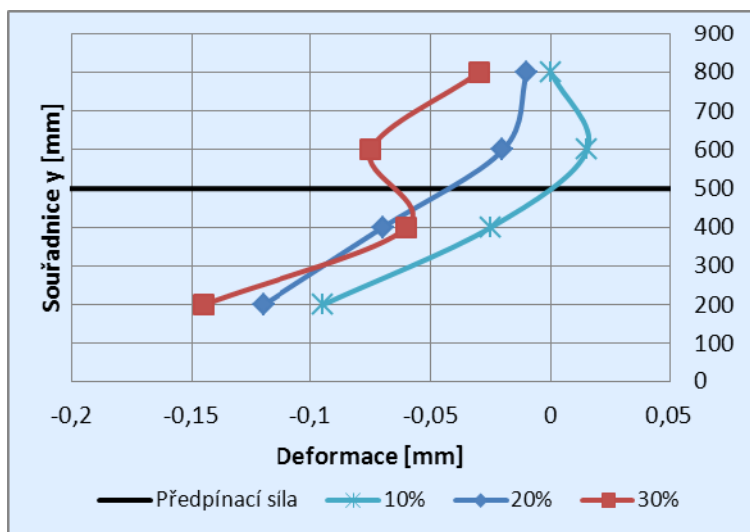
Jak je patrné z obr.3, tvar deformace zdiva ve směru A v místě předpínací tyče odpovídá výrazné koncentraci napětí přímo pod kotevní deskou, zatímco nad a pod úrovní kotevní desky jsou deformace menší. Průběhy deformací jsou přibližně ve stejných odstupech pro jednotlivé velikosti předpínacích sil.



Obr. 3: Průběhy deformací zdiva ve směru A

Zajímavější průběh deformací je ve směru B (obr.4). Výsledný průběh deformací je pravděpodobně ovlivněn již působící předpínací silou ve směru A. Při zatížení předpínací silou o hodnotě 30 % pevnosti zdiva v tlaku kolmo na ložné spáry je patrné, že k deformacím zřejmě přispělo i větší stlačení vyrovnávací malty M5 (tl. 30 mm) pod roznášecí deskou, popř. nekvalitním provedením maltových svislých spár. Nadměrné deformace ve směru B v dolní části zdiva byly pravděpodobně důsledkem zatížení od předpínací síly ve směru A, protože přibližně ve stejné výškové úrovni je umístěna roznášecí deska, resp. její spodní část, která mohla způsobit posunutí vrstvy cihel.

Z výsledků je patrné, že by bylo vhodné provést stejné měření s postupným předpínáním v opačném pořadí, tj. nejprve směr B a poté směr A, aby došlo k ověření správnosti dosažených výsledků, k jejich kontrole a ověření hypotéz.



Obr. 4: Průběhy deformací zdiva ve směru B

4 ZÁVĚR

V článku je popsáno laboratorní měření deformací na předpjatém zděném rohu. V úvodu je pojednáno o určení velikosti předpínacích sil, které byly pro laboratorní měření zvoleny bezpečně s ohledem na kvalitu vyplnění spár maltou. Vzorek byl zatížen svislým zatížením a poté předpínací silou ve dvou směrech. Jsou vykresleny deformace zdiva pro různé velikosti předpínacích sil ve dvou směrech. V přípravě je měření zděného rohu s použitím větších předpínacích sil až do 50 % pevnosti zdiva v tlaku kolmo na ložné spáry. Připraveny jsou také vzorky pro stanovení modulu pružnosti cihel i matly, pro budoucí srovnání s numerickým modelováním v programu na principu MKP [13;14;15;16;17].

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek byl realizován za finanční podpory SGS grantu, interní číslo SP 2012/36.

LITERATURA

- [1] ČAJKA, R. Strengthening of Historical Structures on Flooded and Undermined Territory. *International Geotechnical Engineering, Saint Petersburg*. 17-19. September 2003, Russian, ISBN 5-93093-204-2.
- [2] ČAJKA, R. Lifetime Enhancement of Historical Structures on Flooded and Undermined Territory. *Integrated Lifetime Engineering of Buildings and Civil Infrastructures, and*

International Symposium ILCDES 2003. 1-3. December 2003, Kuopio, Finland, ISSN 0356-9403, ISBN 951-758-436-9.

- [3] SCHUBERT, P.; HOFFMANN, G. Druckfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen. *Mauerwerk-Kalender 1994*, Ernst Sohn & Berlin 2004.
- [4] BAŽANT, Z., KLUSÁČEK, L. *Statika při rekonstrukcích objektů*. VUT Brno, 2004.
- [5] KLUSÁČEK, L.; BAŽANT, Z. Předpínání staveb ve vztahu k podloží. *Sborník příspěvků 13. mezinárodního semináře 2008*, Ostrava 2008. VŠB-TU Ostrava 2008, s. 21 – 26. ISBN 978-80-248-1715-6
- [6] KOŠATKA, P.; LORENZ, K.; VAŠKOVÁ, J. *Zděné konstrukce 1*. ČVUT Praha, 2006
- [7] ŠULÁK, P. Dlouhodobé sledování chování předpjaté konstrukce. *Sborník příspěvků 13. mezinárodního semináře 2008*, Ostrava 2008. VŠB-TU Ostrava 2008, s. 27 – 33. ISBN 978-80-248-1715-6
- [8] MYNARZOVÁ, L. *Statická analýza konstrukcí zděných staveb*. Disertační práce 2009. VŠB-TU Ostrava 2009. ISBN 978-80-248-2064-4.
- [9] ČSN EN 1052-1: Zkušební metody pro zdivo. Část 1: Stanovení pevnosti v tlaku. Český normalizační institut, 2000.
- [10] ČSN EN 1015-11: Zkušební metody malt pro zdivo. Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku. Český normalizační institut, 2000.
- [11] ČSN ISO 13822 Zásady navrhování konstrukcí – Hodnocení existujících konstrukcí. Český normalizační institut, 2005
- [12] ČSN P ENV 1996-1-1: Navrhování zděných konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby. Pravidla pro vyztužené a nevyztužené zděné konstrukce. Český normalizační institut, 1996.
- [13] ČAJKA, R., KALOČOVÁ, L. Modeling and Analysis of Post-Tensioned Masonry. *The eleventh International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. 18-21. September 2007, St. Julians, Malta 2007, ISBN 978-1-905088-17-1.
- [14] ČAJKA, R., KALOČOVÁ, L. Progressive approach to the analysis of post-tensioned masonry structures using FEM. In *EngOpt 2008 - International Conference on Engineering Optimization*. Rio de Janeiro 1-5. Juni 2008. Ed. J. Herkovitz, A. Canelas, H. Cortes, M. Aroztequi, 2008. ISBN 978-85-7650-152-7.
- [15] GIORDANO, A., MELE, E., DE LUCA, A. *Modelling of historical masonry structures: Comparison of different approaches through a case study*. Engineering Structures. July 2002, ISSN: 01410296, DOI: 10.1016/S0141-0296(02)00033-0
- [16] MATERNA, A., BROŽOVSKÝ, J. Constitutive model for two-dimensional modeling of masonry. In *proceedings of the Eleventh International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing 2007*, Malta 2007.
- [17] ZUCCHINI, A., LOURENCO, P. B. *A micro-mechanical model for the homogenisation of masonry*. International Journal of Solids and Structures. Juni 2002, DOI: 10.1016/S0020-7683(02)00230-5

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Ladislav Klusáček, CSc., Ústav betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební, VUT v Brně.

Ing. Vladimír Priechodský, PhD., Katedra betonových konstrukcí a mostov, Stavební fakulta, STU v Bratislave.

Prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc., Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební, ČVUT v Praze.